

UDC 669.162.267.34 : 669.162.263.43 : 669.162.262 : 669.046.582

論 文

尼崎 1 号高炉の解体調査結果*

成田 貴一**・佐藤 忠***・前川 昌大****

富貴原 璋***・金山 宏志****・笹原 茂樹****

Report on Dissection of Amagasaki No. 1 Blast Furnace

Kiichi NARITA, Tadashi SATO, Masahiro MAEKAWA,
Sho FUKIHARA, Hiroshi, KANAYAMA, and Shigeki SASAHARA

Synopsis :

In order to investigate the internal state of blast furnace, Amagasaki No. 1 B.F., having the inner volume of 721 m³, was blown down and quenched with water on 5th November 1976, after a normal operating condition.

In this paper, the results of dissection such as the general views of burden distribution, temperature distribution, change in physical and chemical properties of burden materials in the furnace are described.

1. 緒 言

わが国では新日本製鉄東田 5 号高炉をはじめとして、今日までに 9 基^{1)~6)}の高炉の解体調査が行われた結果、高炉炉内における装入物の物理的・化学的性状の変化および軟化融着帯の形状などの炉内状況が逐次明らかにされてきた。とくに軟化融着帯の形状は炉況に大きく影響する重要な要因の 1 つと考えられるにいたり、現在、さらに軟化融着帯の機能、その生成機構ならびに制御法についても研究が進められている。

しかしながら、各高炉では、炉容、原料の性状、配合率および操業法などが異なっているため、上記の課題を解決するに当たり、なお多くの高炉解体調査結果を考慮する必要がある。そこで、神戸製鋼所、尼崎 1 号高炉において鉄鉱石類については、ドロマイト添加ペレット 40%、焼結鉱 40% および塊鉄鉱石 20% を配合し、またコークスについては 5 チャージに 1 回の割合で中粒コークスを装入して製鋼用銑を吹製したのち吹き止め、炉内の装入物の性状をはじめ軟化融着帯の形状、温度分布ならびに硫黄、アルカリ、亜鉛などの化学成分の炉内分布などを調査した。本稿ではこれらの調査結果の概要を示す。

2. 高炉解体調査法

2.1 吹き止め前の操業および装入物

尼崎 1 号高炉は炉内容積 721 m³、炉床径 5.2m、シャフト高さ 11.8m の小型高炉であり、鋳鉄銑吹製用高炉として昭和 43 年 5 月より操業をつづけていたが、吹き止めに際し昭和 51 年 10 月 8 日から製鋼用銑の吹製に操業変更を行つた。吹き止め前 11 月 4 日 4 時から 28 min 間休風を行つたが、その後炉況は順調に推移したので確認したうえで 11 月 5 日に吹き止めた。吹き止め前 11 月 3 日の操業結果を Table 1 に示す。

本高炉の主原料の配合率は、ドロマイト添加ペレット 40%、自溶性焼結鉱 40%、インド鉱石 10% およびマウンテンニューマン鉱石 10% であり、高炉には混合装入した。またコークスについては、従来、コークス製造時に発生する粒径 15~25 mm の中粒コークスの有効利用を図るために、通常のコークスに約 20% 混合して小型高炉で使用しているが、本調査では試験的に 5 チャージに 1 回の割合で中粒コークスを層状に装入し、その炉内挙動を明らかにした。

各装入原料の化学成分組成を Table 2 に示す。

* 昭和 53 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 4 月 9 日受付 (Received Apr. 9, 1980)

** (株)神戸製鋼所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*** (株)神戸製鋼所尼崎製鉄所 (Amagasaki Works, Kobe Steel, Ltd.)

**** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Fukiai-ku Kobe 651)

2.2 高炉冷却方法

昭和 51 年 11 月 5 日 5 時 55 分に重油吹き込みを止めて減風を開始し、同日 6 時 30 分に完全に吹き止めた。冷却法としては従来から行われている水冷方式を採用し、同日 21 時から炉頂より散水冷却を開始した。翌日 18 時 25 分から羽口からの注水を開始し、11 月 20 日 15 時 30 分に炉底排水温度 39°C になり、注水を完了した。

Table 1. Operating condition of Amagasaki No. 1 blast furnace before blow-down.

	One month before blow-down		3-11-1976	
Production (t/d)	1 290		1 380	
Blast volume (Nm ³ /min)	1 177		1 174	
Blast press. (g/cm ²)	1 044		1 067	
Blast temp. (°C)	1 066		1 080	
Humidity (g/Nm ³)	10.9		10.3	
Coke ratio (kg/t)	441		409	
Oil ratio (kg/t)	45		42	
Fuel ratio (kg/t)	486		451	
Metal Si (%)	0.90		0.80	
S (%)	0.042		0.040	
Burdens	(kg/ch)	(%)	(kg/ch)	(%)
Sinter	6 700	42.1	6 700	39.9
Pellet	6 400	40.3	6 700	39.9
Ore (India)	1 300	8.2	1 700	10.1
Ore (Mt. Newman)	1 500	9.4	1 700	10.1
Total	15 900	100.0	16 800	100.0
LD slag	100		0	
Fe Mn ore	150		150	
Serpentine	200		0	
Limestone	0		100	
Metal	700		0	
Coke base	4 700		4 700	
Ratio of small size coke		20.0		20.0

了した。

2.3 解体作業およびサンプリング

注水冷却完了後、高炉の解体作業を開始した。まず、高炉を上部から 1.5m ごとに区切り 11 段に分け、最初は上部第 11 段の東側半分をまず掻き出して南北断面を観察し、所定の位置より各種試料のサンプリングを行い、この作業を順次第 1 段までくり返し行つた。羽ロレベルから炉床までの領域では高炉炉床を円周方向に 28 ヶの扇型のブロックに分割し、順次掘り出してその垂直断面の観察、写真撮影およびスラグ、メタルおよびコークスのサンプリングを実施した。また、掻き出し前に高炉のシャフト部および羽口前の一部の領域に樹脂を流し込んで装入物を固定したのち炉内から取り出し、垂直に切断して断面の観察を行つた。

2.4 鉱石類の性状調査方法

炉内から採取した試料について、粒度分布、強度、化学分析などを行つた。化学分析用試料の調整は以下の要領で行つた。サンプルのうち鉱石類の種別の明瞭なものについては、それぞれ別々にディスクミルで粉碎した。軟化融着しているため分離が不可能なものについては混合物として粉碎した。さらに金属化が進みディスクミルでは粉碎不可能な塊状試料については断面写真撮影後その一部を破碎するかあるいはドリルで削り取り、その削り屑をディスクミルで粉碎した。滴下帯におけるスラグおよびメタルについてはおのおのできるだけよく分離したのち粉碎し化学分析に供した。

3. 調査結果および考察

3.1 軟化融着帯形状の特徴

尼崎 1 号高炉の南北断面の装入物分布状況を Fig. 1 に示す。本高炉の軟化融着帯は従来の高炉解体調査^{1)~6)}により明らかにされた逆 V 型、W 型および V 型と異なり、かなり特色のある形状を示している。すなわち高炉の南側と北側とが非対称の N 字型に近い形状であり、炉中心部では北側からの融着層が炉床部残鉄層まで降下している。したがって炉床部には円錐型の炉芯コークスの

Table 2. Chemical composition of burden materials (%).

Kinds of burden	T.Fe	M.Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Zn	S
Dolomite fluxed pellets	60.4	0.19	0.40	5.53	3.84	1.72	1.40	0.36	0.048	0.041	0.008	0.011
Self fluxed sinter	57.0	0.52	9.66	9.86	5.68	2.66	0.22	0.12	0.053	0.084	0.036	0.008
India iron ore	67.2	0.09	<0.10	0.06	0.94	0.92	0.12	0.02	0.058	0.007	0.004	0.002
Mt. Mewman iron ore	69.0	0.20	0.10	0.03	1.17	0.29	0.21	0.01	0.002	0.003	0.004	0.003

存在は認められなかった。

北側（出銑口側）の No. 1 および No. 4 羽口からの重油吹き込みは停止していたものの、全羽口から送風していたにもかかわらず、非対称の軟化融着帯が生成した点については、後に示す Fig. 3 のレースウェイの大きさからわかるとおり、北側の No. 1, No. 2 および No. 14 羽口からの送風が、炉内通気抵抗の不均一性または送風設備に関連した原因などにより、相対的に少なかったことによるものである。すなわち、送風温度が 1080°C と低いことにも関連し、北側の軟化融着層を溶融滴下させるだけ十分な熱量が供給されなかったことによるものと考えられる。また北側の羽口先コークス燃焼量が少ないために、羽口上部のコークス降下が停滞し、

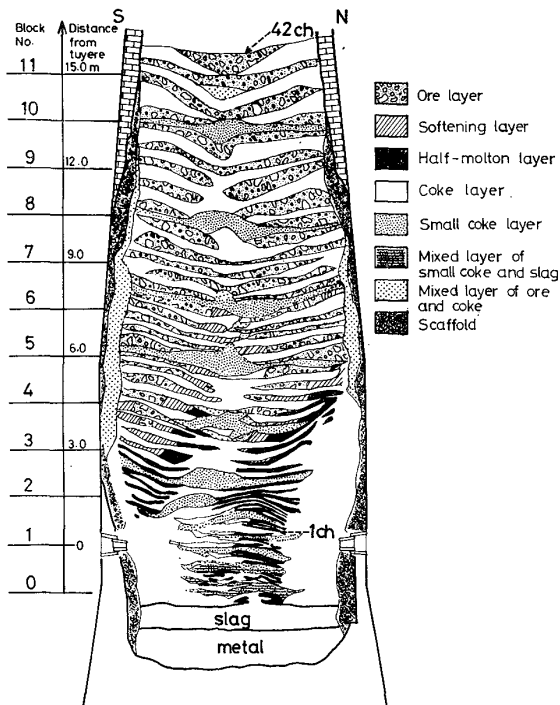


Fig. 1. Distribution of burdens in Amagasaki No. 1 blast furnace.

その結果、鉄鉱石類の降下も周辺部で停滞し、中心部へ移動したものと考えられる。

なお、炉内ガス流れに関しては Fig. 2 に示した炉内温度分布からもわかるように、南側で中心流、北側で周辺流となっていたと推定される。

3.2 各種装入物の堆積状況

断面観察により明らかにされた各種装入物の炉内における状況の概要を示すとつぎのとおりである。

Fig. 1 によれば、鉄鉱石層およびコークス層は炉壁部を除きそれぞれ層の状態をよく保っているが、その層厚は下部に降下するにともなうて薄くなり、またその堆積角度も小さくなっている。いつぱう、シャフト中段から炉腹にかけて、炉壁部に鉄鉱石類とコークスとの混合層が存在している。これらの点はこれまでに実施された他の高炉の解体調査の所見とよく一致している。しかしながら本高炉では 5 チャージに 1 回の割合で装入した中粒コークスが中心部で流動化して盛り上がり、そのために中粒コークス直上の鉄鉱石層が中心部で切断されるという特異な現象がみられた。これに関連して吹き止め前に測定した炉口半径方向のガス温度は周辺部で約 160°C 、中心部で約 370°C となっており、炉内ガスの中心流化の傾向がみられた。

つぎに、鉄鉱石類とコークスの炉内での挙動について示すと、まず、シャフト上部 (39 チャージ・中粒コークス層を含む) の垂直断面の状態を示した Photo. 1 からわかるように通常コークス層中の大きい空隙にはペレットが流れ込んでいるが、空隙の非常に小さい中粒コークス層へのペレットの流れ込み現象はほとんどみられない。また、通常コークスは炉全体をとおして中心部に大粒が集まりやすい傾向がみられた。

いつぱう、ペレット 40% および焼結鉄 40% の混合装入のため両装入物の形状により炉内分布に偏析が生ずるものと予測されたが、偏析はほとんどみられず、塊鉄

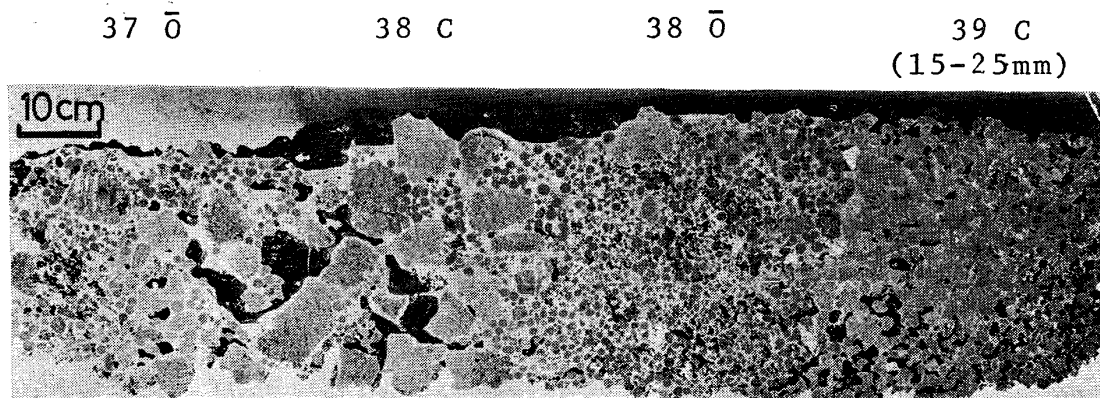


Photo. 1. Vertical section of shaft sample fixed by resin.

石とともによく混合された状態で存在していた。

3.3 炉内温度分布

本高炉では、炉上部の温度分布についてはテンピルペレット法により、また炉下部については炉内から採取したコークスの黒鉛化度すなわち [002] 方向の結晶子の大きさを表す L_c の値を求めることによつて温度の推定を行つた。 L_c 測定用コークスの採取位置は直径方向に 1 m 間隔、高さ方向に 50 cm 間隔であり、温度勾配の大きい領域についてはさらに細分化した。なお L_c により温度を推定するに際して、あらかじめ高炉装入前のコークスを電気炉で種々の温度に加熱したのち L_c を測定し、 L_c と温度との関係を示す検量線を作成した。

テンピルペレット法ならびにコークスの L_c により推定した高炉内温度分布を Fig. 2 に示す。コークスの L_c により求めた温度分布は図中に示した融着帯形状とよく対応しており、軟化融着帯は $1200^{\circ}\sim 1500^{\circ}\text{C}$ の範囲内に存在する。北側では、炉床中心部に残存する軟化融着層の影響で、炉壁に沿つた等温線を示している。

3.4 羽口先レースウェイの形状について

羽口先のコークス分布調査結果の 1 例として No. 9 羽口先のコークス層断面を Photo. 2 および 3 に示す。Photo. 2 は羽口軸に垂直な断面を、Photo. 3 は羽口軸

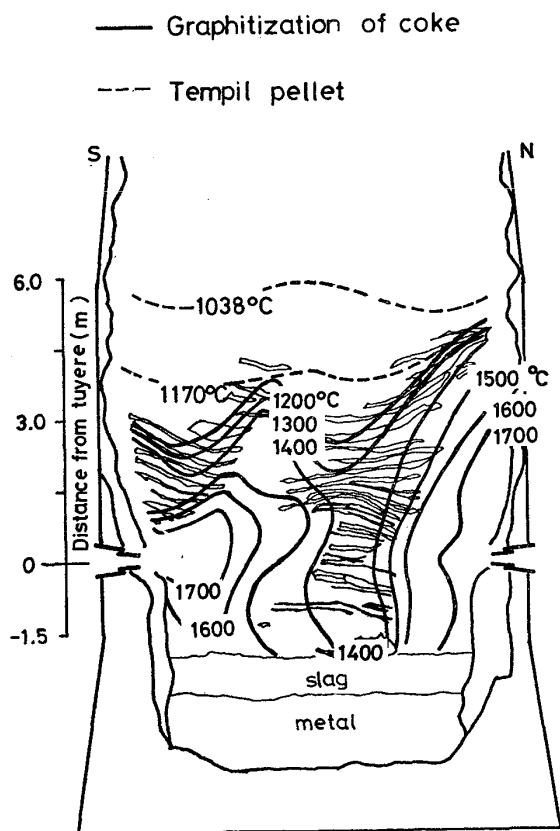


Fig. 2. Temperature distribution in the blast furnace estimated by tempil pellets and graphitization of coke.

に平行する上下断面を示す。Photo. 2 および 3 によると、休風にともなつて上部のコークスが降下して形成された比較的空隙の多い領域がみられるが、この領域が操業中のレースウェイの空間と推定され、幅は 50~70 cm、深度は 110~120 cm 程度とみられる。このレースウェイ領域の下に小粒コークスの密充填領域およびスラグ、メタル粒子を含む粉コークスの密充填層が 3~4 層存在している。

いつぼう、全羽口のレースウェイ近くのコークス、スラグおよびメタルの堆積物の軟弱な部分と強固な部分を区別し、その境界線を Fig. 3 に示すように描いた。Fig. 3 において各羽口先にみられる楕円形の領域には軟弱なコークス粒が存在しており、この領域が操業中のレースウェイに近いものと推定される。

3.5 装入原料の炉内性状

3.5.1 焼結鉱、ペレットおよび塊鉱石

(1) 強度

Fig. 4 は炉内で採取した焼結鉱、ペレットおよび塊鉱石の回転強度を示す。Fig. 4 によれば、いずれの装入物も装入後強度が著しく低下している。これは hematite から magnetite への還元過程における体積膨張に起因する数多くのき裂の発生にともなうものであり、実験室での還元後強度試験結果ともよく一致している。焼結鉱およびペレットについては炉を降下して還元が進むにともなつて金属鉄のシンタリングにより強度の著しい回復がみられるが、塊鉱石の場合は強度回復の程度は小さい。強度が回復したあとシャフト部においては強度の変化はほとんどみられないが、炉腹部でペレットおよび塊鉱石は若干強度が上昇している。

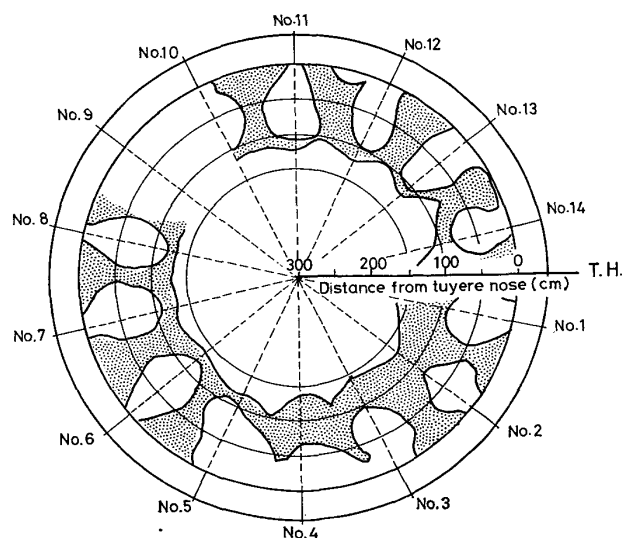


Fig. 3. Horizontal section at tuyere level.

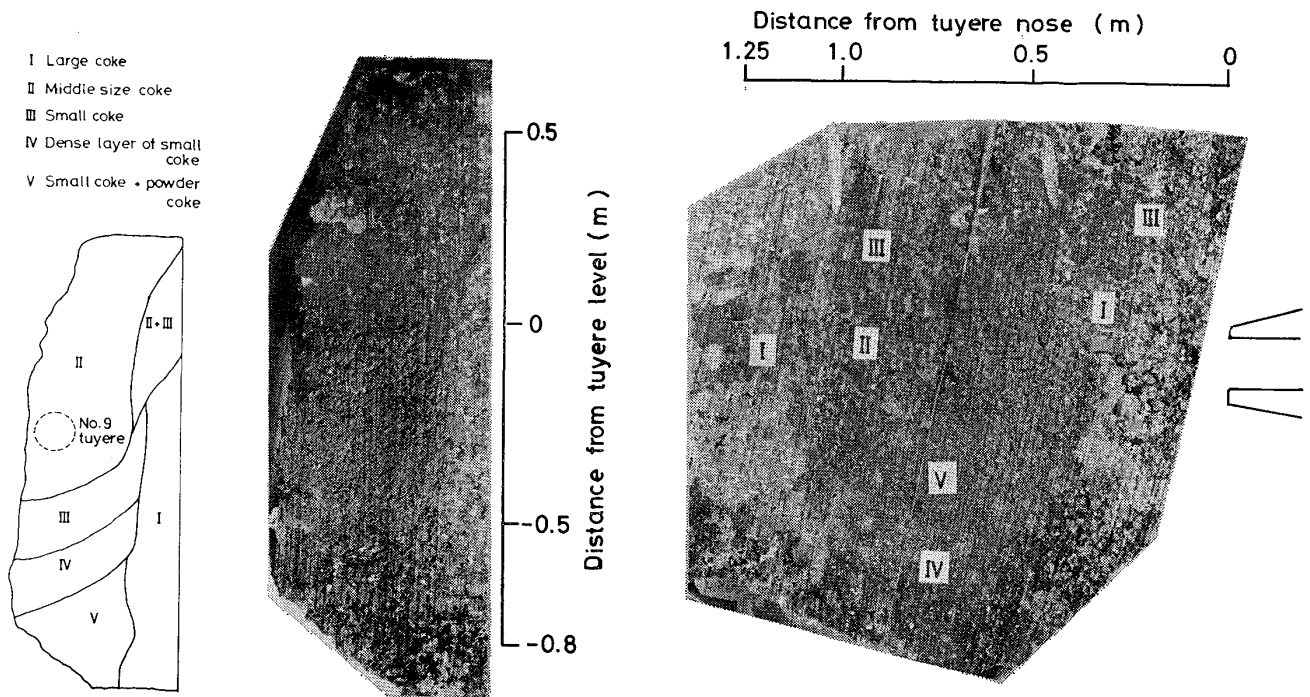


Photo. 2. Vertical section across axis of No. 9 tuyere (0.75m from tuyere nose).

Photo. 3. Vertical section in front of No. 9. tuyere.

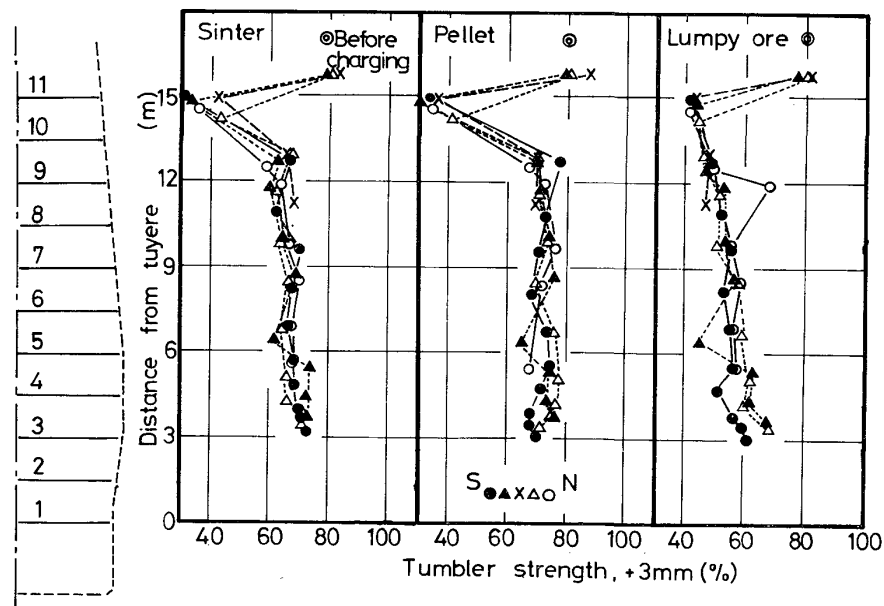


Fig. 4. Change in tumbler strength of burden in vertical direction.

(2) 粒度

Fig. 5 は焼結鉱、ペレットおよび塊鉱石の平均粒径ならびに鉄鉱石類全体に占める -5mm 粉率を示す。Fig. 5 によれば、焼結鉱および塊鉱石は装入後の強度低下に相応して平均粒径が低下しているが、ペレットの場合は平均粒径の低下はみられない。 -5mm 粉率はシャフト上部で最も高くなり約 35% に達している。炉内のより

高い温度領域に降下するに伴って上層部で粉化した粒子が再び融着しはじめるため、 -5mm 粉率はしだいに減少し、炉腹部においては約 20% になっていた。

(3) 還元率

軟化融着帯近くの鉄鉱石類の還元率は Fig. 6 に示したとおり軟化融着帯上部で約 40%、内部で約 80% となっている。軟化融着帯までの還元率が約 20% と予想よ

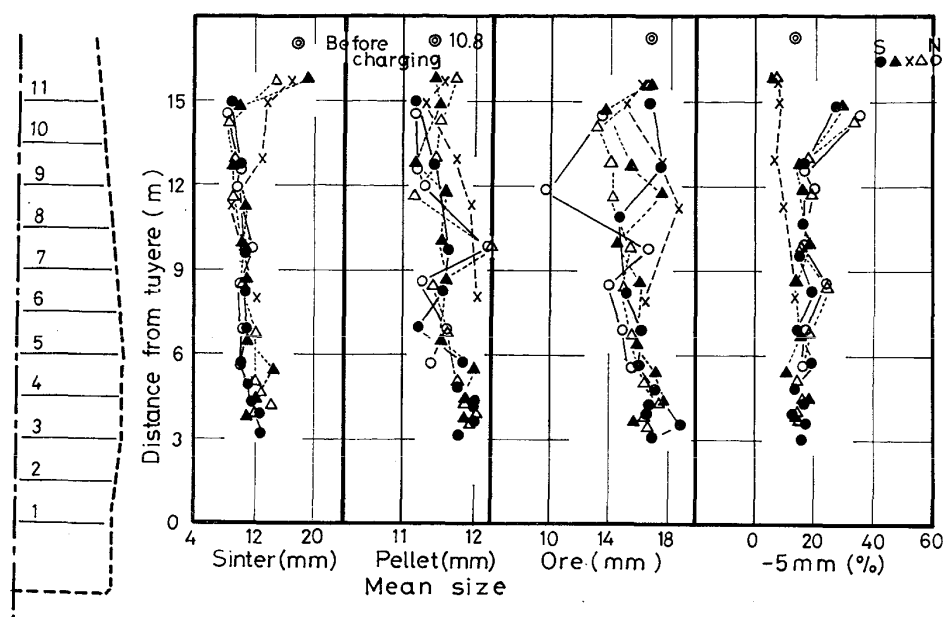


Fig. 5. Change in mean size and -5 mm fraction of burdens in vertical direction.

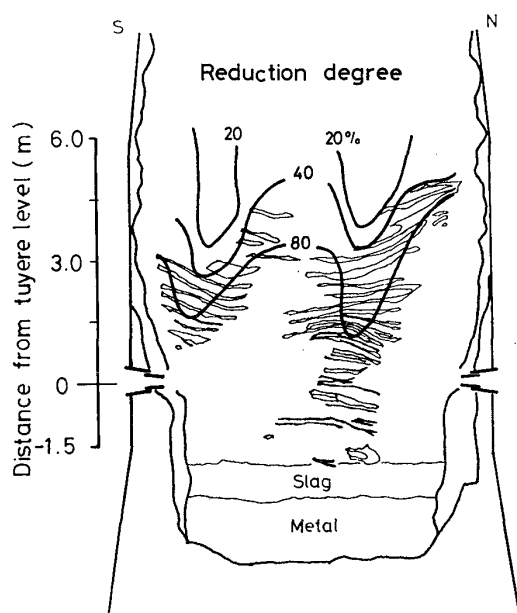


Fig. 6. Distribution of reduction degree of ores.

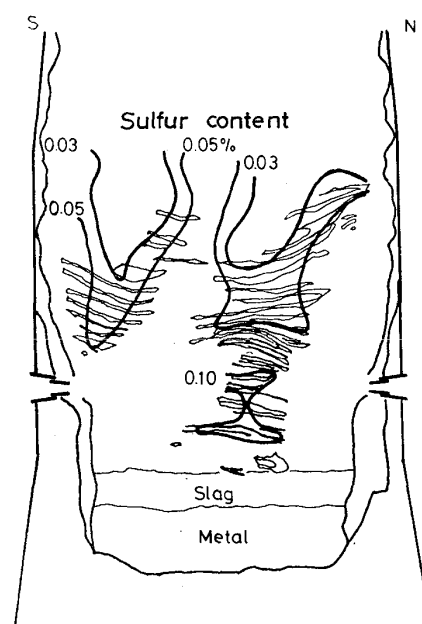


Fig. 7. Distribution of sulfur content in ores.

りも低いのは水冷による再酸化のためであり、また軟化融着帯においては鉄鉱石類は著しく融着し緻密になつていたので水による再酸化を受けにくかつたものと考えられる。なお還元率分布は温度分布とよく対応しており、80%の等還元率線はほぼ1400°Cの等温線に一致している。

3.6 鉄鉱石類の化学成分の分布

(1) 硫黄

硫黄の炉内分布を Fig. 7 に示す。硫黄含有量は融着開始位置にあたる羽口レベル上3m付近から増加し、さ

らに下方に進むにつれて硫黄含有量は増大し、炉床中心部に残存する融着帯領域で0.1%以上の最大値を示している。

温度分布と対応すれば硫黄含有量の増加は1200°C付近からはじまり、最大値を示す領域は1300~1400°Cの領域に一致している。

(2) アルカリ

アルカリ ($K_2O + Na_2O$) の炉内分布を Fig. 8 に示す。羽口上4~5m付近からアルカリ含有量が増加し、

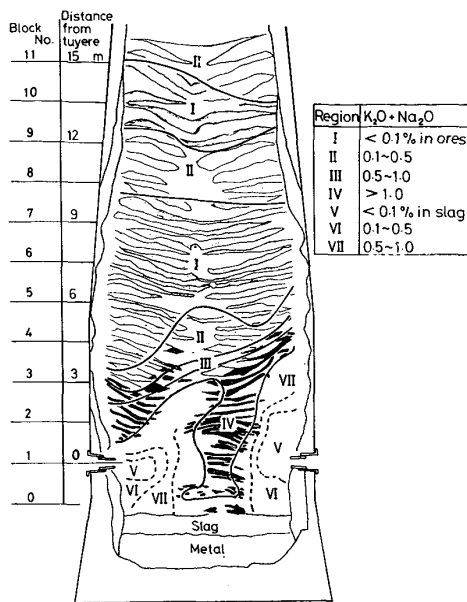


Fig. 8. Distribution of alkali content in ores and slag.

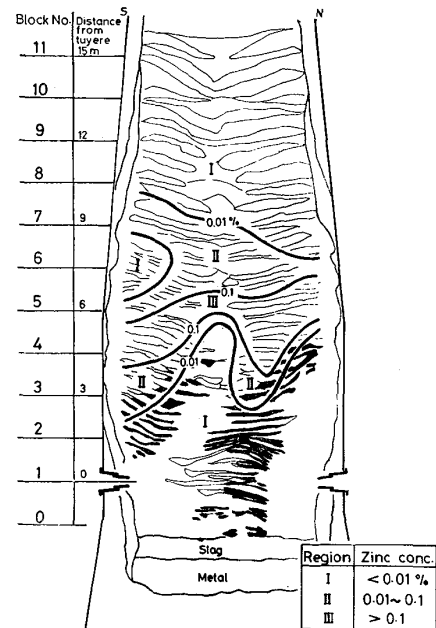


Fig. 10. Distribution of zinc content in ores.

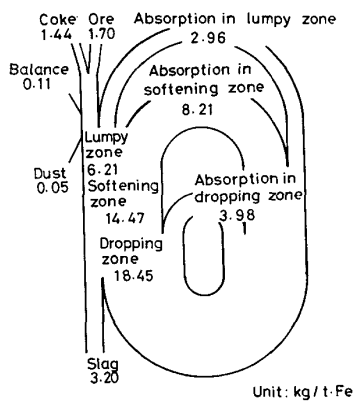
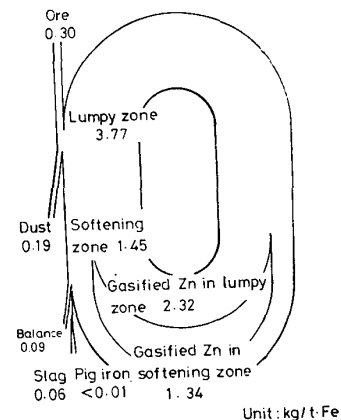

 Fig. 9. Circulation of alkali (K_2O+Na_2O) in the blast furnace.


Fig. 11. Circulation of zinc in the blast furnace.

周辺部と中心部で異なるが羽口上 2~3m 付近で 2% 前後の最大値を示す。

温度分布と対応すれば、アルカリ含有量は硫黄と同じように融着開始温度 1200°C から増大しはじめ $1300^{\circ}\sim 1400^{\circ}\text{C}$ の領域で 1% 以上の最大値を示し、鉄鉱石類の滴下領域で減少している。

上記のアルカリ分布状態から、アルカリは塊状帯から軟化融着帯にかけて増加し、滴下帯から羽口レベルに近づくにつれて気化し、気化したアルカリは再び軟化融着帯に至って凝縮あるいは吸収される。すなわちアルカリは炉内を循環しており、各領域における循環量を示すと Fig. 9 のとおりであった。Fig. 9 のアルカリバランスは炉内から採取した鉄鉱石類およびコークスの分析値ならびに吹き止め前の操業時における O/C から計算で求めたものである。

(3) 亜鉛

亜鉛の炉内分布を Fig. 10 に示す。亜鉛含有量は羽口レベルから約 6m 上の領域まで増加し、この領域で 0.1% 以上の最大値を示す。温度分布と対応すれば、亜鉛は温度約 1100°C の領域に濃縮している。Fig. 11 は鉄鉱石類およびコークス中の亜鉛の分析値から求めた炉内各領域における亜鉛の循環量を示したものである。

3.7 滴下帯におけるメタル・スラグの化学成分変化

約 1500°C を超えた領域では融着層から滴下したスラグおよびメタルがコークス層内を流下する。滴下帯のコークス層内に保持されたメタルおよびスラグの化学分析値の炉高方向の推移を南北断面 5 ヶ所について示すと Fig. 12 および Fig. 13 のとおりである。滴下帯は南北対称ではなく、北側では羽口レベル上 3.5m 付近から、また南側では 1m 付近からはじまっているため、これが

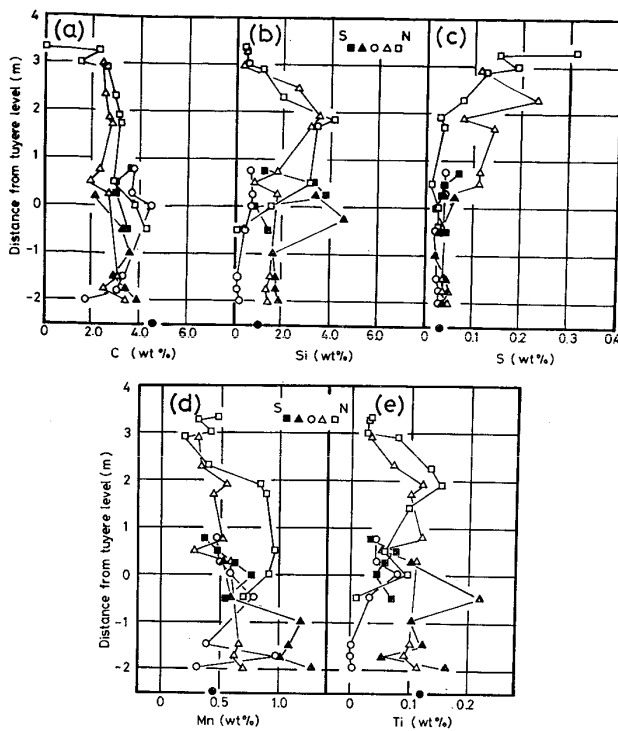


Fig. 12. Change in chemical composition of metal.

南北における各成分含有率の推移の差の原因となつている。

(1) メタル成分の推移

C濃度は滴下後まもなく3%程度の値を示し、ついで約4%を維持したのち出銑値(4.53%)になる。滴下帯における浸炭速度はかなり大きいものの飽和濃度にまで達していない。また比較的低い温度にある炉床中心部のメタル中C濃度が周辺部とほぼ同じ値になつているのは、温度が低いためSi濃度も低くなる結果によるものと考えられる。

Si濃度は滴下後増大し、4%程度の最大値を経て減少し出銑値(0.97%)になる。Si濃度の推移は温度に対応しており、周辺部の高温領域では高くなり、中心部の低温領域では低い値を示している。

S濃度は北側では滴下時に0.3%以上の値をもつが炉下部に行くにともない脱硫が進行し、羽口レベルでは出銑値(0.037%)に近い値となつている。南側では滴下時にすでに出銑値に近い値を示しており、これはこの領域が高温であるため、反応速度が大きいことによると考えられる。

MnおよびTi濃度の推移については、いずれも滴下位置から1~2m下の位置で出銑値に達している。但し南北および中心の温度により、推移曲線は異なっている。なおTi濃度の推移はSiのそれによく対応している。

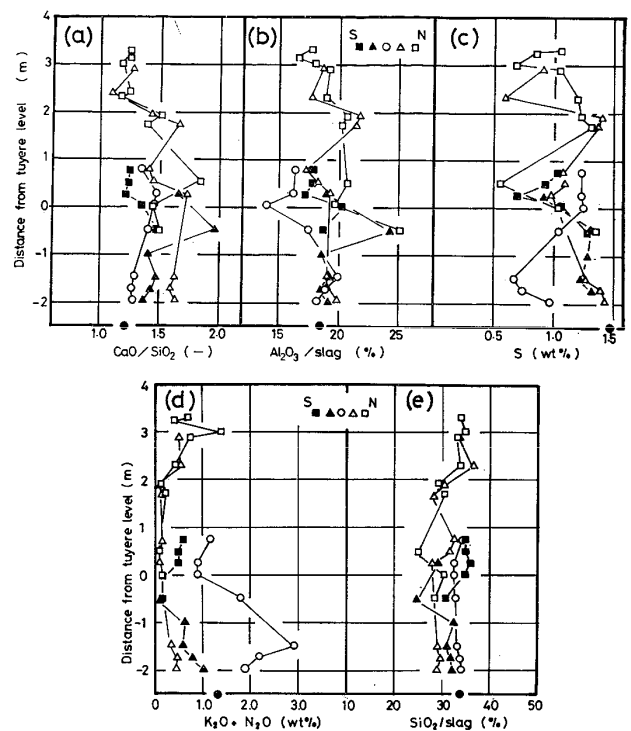


Fig. 13. Change in chemical composition of slag.

(2) スラグ成分の推移

スラグ塩基度は滴下したのち、羽口レベルで1.5~2.0と出滓値(1.22)に比べてかなり高い値となつている。これはこの領域における石灰の滓化ならびにSiO₂の還元によるものと考えられる。羽口レベル以下になるとコークス灰分の滓化によりスラグ塩基度は出滓値にまで低下する。

Al₂O₃については、周辺部において、羽口レベルで約25%の最大値を示し、ついで降下するにともなつて減少している。中心部では羽口レベルにおいても15%と低い値となつており、溶融滴下後にコークス灰分の滓化が起こることを示している。

Sはメタルの脱硫が進むにつれて増加するが羽口レベルで減少する。ついで、中心部をのぞき、炉下部に流下するにともなつて増加し出滓値(1.5%)に近づく。

アルカリ(K₂O + Na₂O)は、中心部をのぞいて、滴下後減少し羽口レベルで0.2%以下の低い値となる。しかし、炉底に近づくにともない再び増加する。中心部では未溶融の融着層が存在しているために、アルカリ量がひじょうに高くなっている。

SiO₂は塩基度と逆の関係で推移しており、高温領域に近づくにともない減少したのち徐々に増加し出滓値(34.9%)になる。

3.8 コークスの性状

炉内各レベルにおいて南北断面の5ヶ所から採取した

コークスの粒径、強度 (DI_{16}^{30}) ならびに固定炭素、灰分、揮発分、アルカリ、亜鉛 および 硫黄の分析値の推移を Fig. 14~Fig. 16 に示す。

(1) 粒径および強度

Fig. 14 によれば、コークスの平均粒径はシャフト上部から下部にかけてほとんど変化しないが、炉腹部から下に降下するにともない徐々に減少し、朝顔下部から羽口にかけて急激に減少している。

いつぱう、コークス強度は、炉径方向でかなりばらつきがみられるが、全体的にみて、シャフト部から羽口レベルまで、下に行くにともなつて低下する。とくに炉腹

以下での強度の低下率が大い。

(2) 固定炭素、灰分および揮発分

コークスの固定炭素および灰分は、Fig. 15 に示すとおり、シャフト上部から中部にかけてはほとんど変化しないがシャフト下部から羽口レベルまで、固定炭素は減少し、それに対応して灰分は増加する。シャフト下部以下で、炉径方向の値が異なっているのは、融着帯の形状に関係した炉内ガス流れの影響を受けソリューションロス反応に差が生じたことによると考えられる。

揮発分は、Fig. 15 に示すように、融着帯の存在するレベルで増加する傾向が認められ、羽口レベルにかけて

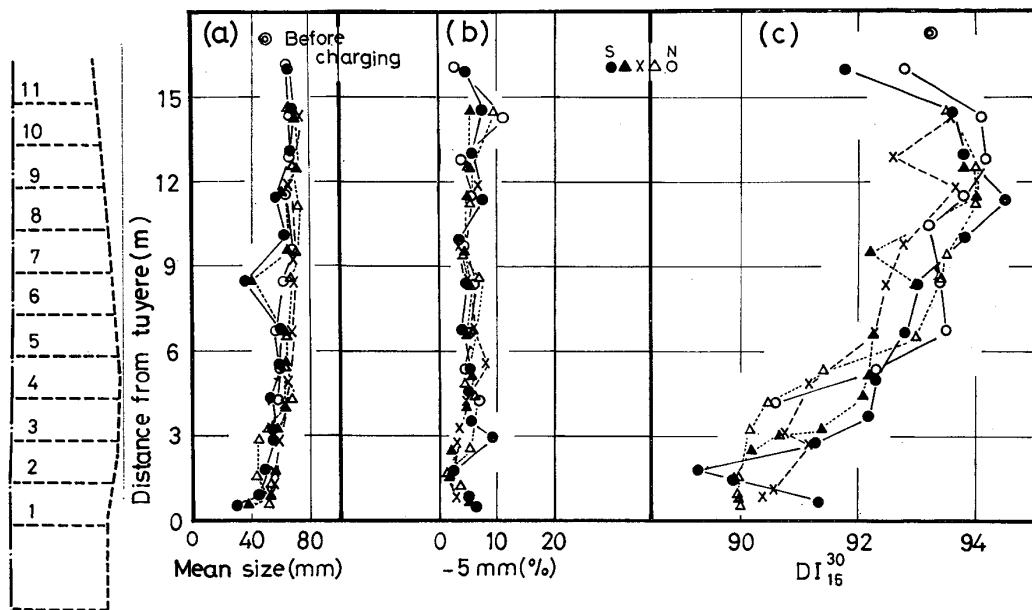


Fig. 14. Change in size and strength of coke in vertical direction.

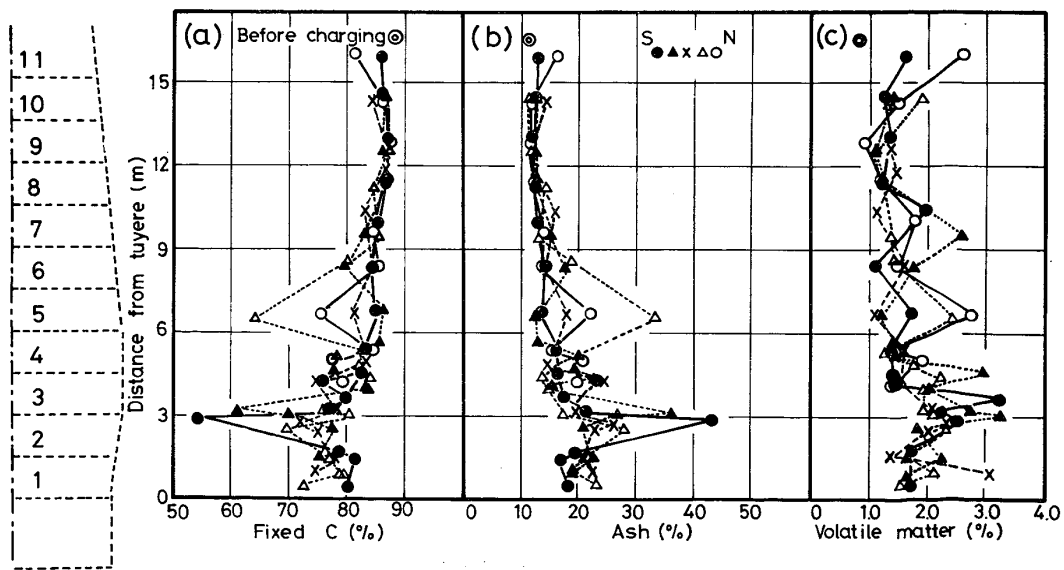


Fig. 15. Change in chemical composition of coke in vertical direction.

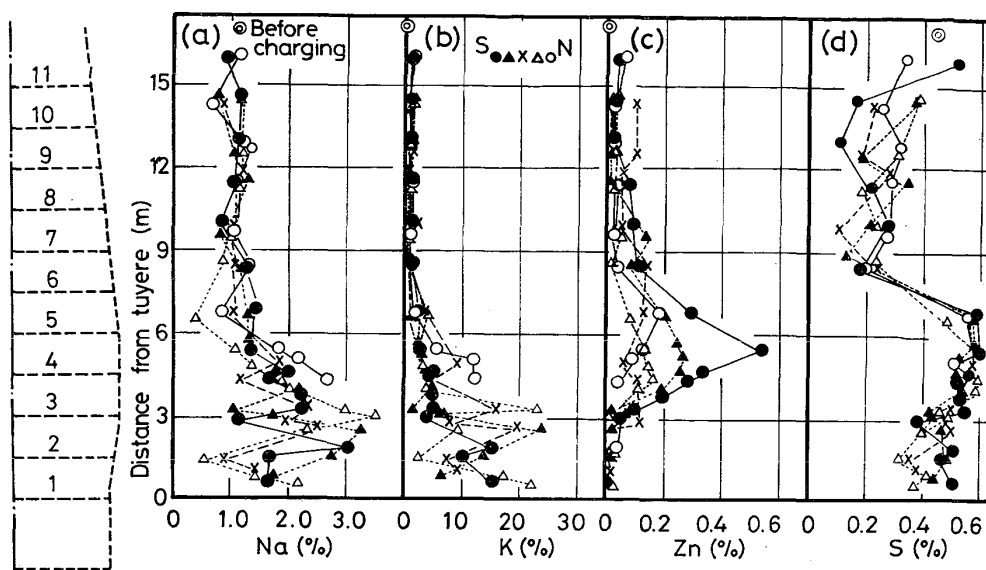


Fig. 16. Change in chemical composition of coke ash in vertical direction.

減少している。

(3) アルカリ，亜鉛および硫黄

コークス灰分中のアルカリ (Na および K) はシャフト部ではほとんど変化がみられないが，融着層が出現する炉腹以下で増加している。亜鉛については，アルカリが濃縮する融着帯よりも上部の約 1100°C 前後の温度領域に濃縮している。また，硫黄については，シャフト中部までは減少傾向がみられるが，シャフト下部から炉腹にかけて最も高い値を示している。

4. 結 言

ペレット 40%，焼結鉱 40% および塊鉱石 20% を使用した尼崎 1 号高炉の解体調査の結果，とくに逆 V 型-V 型の南北非対称の軟化融着帯の存在が明らかになるとともに，各種装入物の炉内堆積状態，炉内温度分布，羽口先レースウェイの形状，大きさ，鉄鉱石類およびコークスの物理的，化学的性状の変化ならびに滴下帯における

メタルとスラグの成分の変化などが明らかになった。

文 献

- 1) 神原健二郎，萩原友郎，重見彰利，近藤真一，金山有治，若山敬一，平本信義：鉄と鋼，62 (1976) 5, p. 533
- 2) 梶川脩二，隅田 昇，吉越英之，福島 勤，鴨志田友男，福山辰夫：鉄と鋼，59 (1973) 9, A81
- 3) 伊沢哲夫，里見弘次，中島龍一，梶川脩二，宮本健彦，隅田 昇，福島 勤：鉄と鋼，61 (1975) 12, S399
- 4) 伊沢哲夫，三浦光敏，里見弘次，斎藤正紀，宮本健彦，福島 勤，古川 武：鉄と鋼，63 (1977) 11, S446
- 5) 佐々木寛太郎，羽田野道春，渡辺雅男，下田輝久，横谷勝弘，伊東考夫，横井 毅：鉄と鋼，62 (1976) 5, p. 580
- 6) 橋爪繁幸，高橋洋光，中川敏彦，富田貞雄，佐藤政明，森岡恭昭，小坂橋寿光：鉄と鋼，64 (1978) 4, S108